

## 간척호 (화옹호) 생성 초기의 수온과 염분의 공간적 구조와 계절적 변화

신 재 기 · 황 순 진<sup>1,\*</sup> · 윤 춘 경<sup>1</sup>

(한국수자원공사 수자원연구원, <sup>1</sup>건국대학교 환경과학과)

**Spatial Structure and Seasonal Variation of Temperature and Salinity in the Early Stage of Reclaimed Brackish Lake (Hwaong Reservoir). Shin, Jae-Ki, Soon-Jin Hwang<sup>1,\*</sup>, Chun-Gyeong Yoon<sup>1</sup> (Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation (KOWACO), Taejon 305-730, Korea; <sup>1</sup>Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)**

In order to evaluate the change of aquatic environment in the reclaimed Hwaong Reservoir, situated in the early stage after construction, this study was conducted to measure the change of precipitation, temperature, and salinity from June 2002 to January 2006. The range and mean of temperature was  $-0.7 \sim 33.4^{\circ}\text{C}$  and  $13.6^{\circ}\text{C}$ , respectively. Temperature of upstream part rapidly changed during the transitional period; from spring to summer and from fall to winter. It showed abrupt decrease with high discharge from the streams temporarily. While, hypolimnetic temperature of upstream happened to be somewhat higher than that of surface or downstream. The range and mean of salinity was  $0.3 \sim 32.3$  psu and  $25.3$  psu, respectively. Vertical difference of salinity was marked, and the change in the surface water was much higher than middle or bottom layers. It showed the marked difference at all stations, except for the bottom layer of upstream into which Namyang Stream flows, indicating that vertical gradient of salinity is strongly sustained in the reservoir. Salinity was changed markedly during the storm period (June ~ October), and freshwater with low salinity was expanded from upstream to downstream along the surface layer. The surface of the reservoir was totally covered by the stream discharged water with a large amount of silt and low salinity during this period. The difference of temperature and salinity between the surface and bottom layer ranged  $-10.6 \sim 9.7^{\circ}\text{C}$  and  $-27.1 \sim 30.0$  psu, respectively. The big difference of salinity appeared with a large discharge of freshwater from the streams or large input of seawater through the gate. Salinity was negatively correlated with temperature, indicating the influence of monsoon storm events on the salinity under the whole watershed scale of this brackish reclaimed reservoir.

**Key words :** Hwaong reservoir, reclaimed reservoir, temperature, salinity, freshwater, seawater, brackish water, Monsoon

\* Corresponding author: Tel: 02) 450-3748, Fax: 02) 456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

## 서 론

화옹호는 조석의 영향이 큰 서해 연안의 만을 방조제와 수문으로 막아 조성된 간척호로서 갯벌을 저수지로 변화시킨 인공 환경시스템이다 (농업기반공사, 2000, 2001; 고, 2001; 황, 2002, 2003). 저수지가 만들어지는 초기 단계에는 하천을 통해 담수(freshwater)가 지속적으로 공급됨으로서 내부의 해수(seawater)와 상호 교환되고, 제염과정을 통해 5 psu 이하(oligohaline)의 담수호가 완성된다 (홍 등, 1976; 농업기반공사, 2000, 2001; 고, 2001). 해수가 담수로 서서히 대체되는 과정에서 기존 갯벌 토양에 내재된 저층의 염분이 상부 수층으로 용출되어 기수 성향을 띠는 수환경을 나타내게 된다 (홍 등, 1976; 신 등, 2000a; 고, 2001). 따라서 담수화가 완성되기 전에는 수리·수문학, 유역의 지형과 오염원 특성 및 물질순환 특성으로 인해 전이적 생태계의 구조와 기능을 보일 수 있다 (홍 등, 1976; 신 등, 2000a, b; 고, 2001; 정 등, 2004).

간척호의 형성기에 체절 작용은 저수지 수체의 유동성을 저하시켜 체류시간이 증가하게 되고 수중 염분도가 점진적으로 감소하는 경시적 환경 변화를 겪게 된다 (Han and Park, 1999; 신 등, 2000a; 고, 2001). 또한, 간척호의 담수화 기간은 유역 강우와 하천의 유하량 등에 크게 의존되는데 (홍 등, 1976), 하구호는 내륙의 하천 중·상류에 만들어진 댐저수지와는 달리 하천수가 바다로 유출되는 종점인 하구에 만들어지기 때문에 하나의 점오염원 역할을 하게 된다 (고, 2001). 상류의 오염물질이 유입 및 축적되어 부하량이 높을 뿐만 아니라 하천이나 연안 환경보다 다소 긴 체류시간을 거치면서 저수지의 수질을 급격하게 악화시키고 부영양화 현상을 유발시킬 수 있는 가능성이 상존하게 된다 (신 등, 2000a, b; 고, 2001; 신 등, 2003).

염분도(salinity)는 담수와 해수에 용해된 총 이온의 농도에 해당하며 (APHA, 1995), 연안에 위치한 기수호는 담수호에 비해 수환경 내부의 화학 및 생물학적 반응 기작이 수온 등 다른 환경요인보다도 염분 구배에 의한 영향을 더욱 강하게 받는다 (Lenz, 1977; Kremer and Nixon, 1978; Ketchum, 1983; Kishi, 2000). 이러한 영향의 세기는 유역과 저수지내의 수문환경 특성에 따라 큰 차이를 보이게 된다 (Wetzel, 2001). 연안의 간척호는 수중 염분도와 밀도의 차이에 의해 담수층과 해수층의 수직적 구분을 보인다 (Han and Park, 1999; 신 등, 2000a). 이러한 현상은 염분약층(halocline) 또는 화학성층

(chemocline)으로 불리며 산소가 풍부하고 염분이 낮은 표층수와 산소가 없거나(무산소) 매우 낮고(빈산소) 염분이 높은 저층수로 분리시키는 것으로서 담수의 유입량에 따라 수역별(상류, 중류, 하류 및 전수역)로 그 비율과 수준을 달리하게 된다 (정 등, 1997; 신 등, 2000a; 고, 2001).

하구의 만을 막아 담수호로 조성하는 사례는 고려시대부터 역사에 기록되고 있다 (고, 2001). 최근 20~30년 동안에 특히 활발하게 전개되어 왔으며 그 결과로서 시화호, 평택호, 남양호, 삼교호, 금강호, 새만금호 및 영산호 등을 포함하는 10개 이상의 대형 호수가 만들어졌다 (고, 2001; 이, 2006). 그러나 유래 없는 수질오염의 진통을 겪은 시화호와 최근에 물막이 공사를 마친 새만금호를 제외한 이들 저수지의 수질환경 조사는 담수화 이후에 대다수 이루어졌으며, 담수화 과정의 기초자료 축적에 대한 필요성은 인식하면서도 실정은 미비하였다 (신 등, 2000a; 신, 2003). 이러한 측면에서 화옹호는 조성 초기부터 담수화 과정을 통한 수질변화를 연구할 수 있는 매우 훌륭한 조건을 가지고 있으며 (황, 2002, 2003), 기존에 형성된 간척호의 환경변화에 대해서도 고찰할 수 있는 학문적 가치를 가지고 있다.

화옹호에 대한 선행 연구는 하구둑 조성 이전에 방조제 건설에 따른 화옹호의 수질예측에 대한 연구가 일부 수행되었다 (농어촌진흥공사, 1998; 경기도, 2002; 김 등, 2004; 장 등, 2006; 정 등, 2006). 또한, 화옹호 내부와 외해의 수질변화 이에 따른 생태변화 조사가 이루어진 바가 있으나 (황, 2002, 2003; Hwang *et al.*, 2003; 정 등, 2004) 단기적 연구에 해당하였다. 그러나 하천, 저수지 및 연안을 포함하는 유역의 통합적 수질관리를 위한 연구는 아직 없는 실정이다.

본 연구는 최근에 완공된 간척호(화옹호)를 대상으로 생성초기의 수온과 염분 농도를 조사하였다. 화옹호는 체절이 완공되었으나 배수갑문을 통해 해수를 주기적으로 유통시켜 기수의 상태를 유지하는 상태에 있다. 담수와 해수의 유입에 따른 수온과 염분의 변동 특성을 파악하고자 하였고, 향후 완전 담수환경으로 이루지는 시기에 간척호 수환경 관리에 대한 기초자료로 활용하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지 개황

화옹호는 서해 연안에 위치한 신생 간척호(N 37° 08' 40.5"~E 126° 41' 16.0")로서 1991년 9월~2012년 12월에 완공될 계획에 있다 (농업기반공사, 2001). 유역은 경

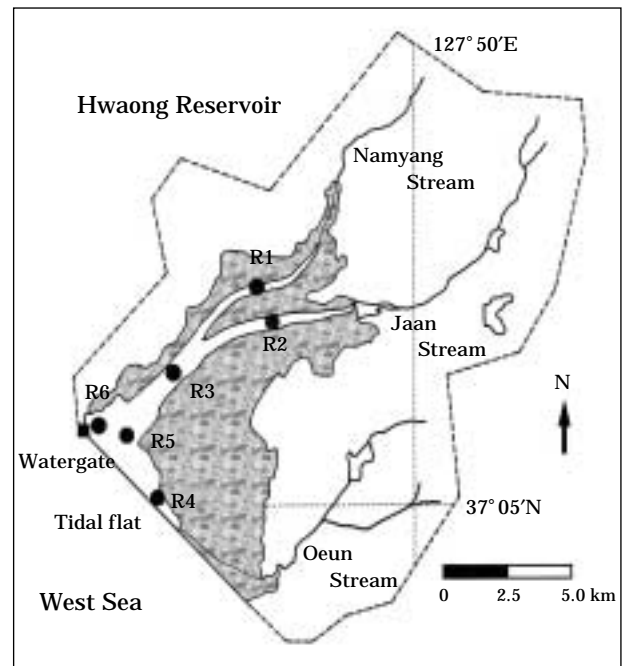
기도 화성시 남양면, 마도면, 서신면, 비봉면, 팔탄면, 우정면 및 장안면으로서 1개 시 7개 면의 행정구역을 포함하고 있다. 저수지의 면적은 1,452 ha이고, 방조제 길이는 9,810 m이다. 그 외 부대 시설은 배수갑문, 어도, 통신문, 제염암거 및 선착장을 갖추고 있다(농업기반공사, 2001). 화옹호의 총저수량은 약  $54 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로서 시화호의 1/6, 새만금호의 1/10 규모에 해당한다(이 등, 1999). 2002년 3월에 몰막이 공사를 최종 완료하였으나 저수지내 수질관리가 어려운 상황으로 전개되어 현재는 조석을 고려하여 배수갑문을 통해 해수를 제한적으로 소통시키고 있는 실정에 있다(Hwang *et al.*, 2003). 환경기초시설 및 호내 수질대책이 완료되는 2007년까지는 배수갑문을 통해 해수를 유통시키며 수질을 관리할 예정에 있으며, 환경기초시설이 완료되는 2008년부터는 해수유통을 중단하고, 담수화를 시작하여 간척농지조성이 완료되는 2012년부터는 농업용수를 취수할 예정이다(농업기반공사, 2000, 2001).

화옹지구 유역에는 화성시 남양동을 관통하며 유역면적이 19.9 km<sup>2</sup>, 유로연장 8.05 km, 유역 평균 폭 2.34 km<sup>2</sup>, 유역형상계수 0.28의 준용하천인 남양천과 가장 긴 유로연장과 유역면적을 차지하고 있는 팔탄면의 자안천, 우정면의 어은천이 있다(황, 2002, 2003). 남양천은 무명봉(해발 140 m)에서 발원하는 유로연장 7 km 수계로서 연중 유량이 매우 적으며, 오염원이 밀집된 남양동을 거쳐 화옹호로 유입되고 있다. 남양천 유역은 남양동 북양리, 송림리, 쌍송리, 마도면, 쌍송리 등 1개동 1개면, 4개리를 차지하고 있으며 용수확보를 위해 설치된 보가 다른 두 하천에 비해 많고 하류부에 설치된 보로 인하여 해수의 영향을 적게 받는다(황, 2002, 2003).

자안천은 태향산(해발 292 m)에서 발원하는 수계로 집중적인 생활하수 유입은 없으나, 농경배수, 산업폐수, 축산폐수가 유입되며, 하류에서는 기설 간척지와 현대자동차 주행시험장을 경유하여 화옹호로 유입되고 있다. 간척지 확보를 위해 설치된 방조제로 인해 화옹호 유입구 부분에 소규모의 체류시간이 긴 장방향의 담수호가 조성되어 있으며, 방류구의 수문에 의해 유량이 조절되기 때문에 방류구 개방 전까지는 화옹호로 유입되는 유량은 거의 없다(농업기반공사, 2000, 2001; 경기도, 2002). 어은천은 대남산(해발 60 m) 기슭에서 발원하여 먹우지를 지나 남쪽으로 흘러 좌우 농경지에 물을 공급해 주는 먹우천과 합류하는 수계로서 우정면 소재지의 생활하수, 산업폐수, 농경배수에 의해 오염되어 화옹호로 유입되고 있다(농업기반공사, 2000, 2001). 방조제 체절 전에는 조류의 영향을 많이 받은 감조하천으로 대조기에는 해수가 하천

**Table 1.** General description of land use pattern in the Hwaong Reservoir Watershed.

Factors\Streams	Namyang	Jaen	Oeun
Agriculture area (km <sup>2</sup> , %)	6.44 (32.40)	18.26 (34.70)	11.09 (47.20)
Forest area (km <sup>2</sup> , %)	10.48 (52.70)	27.60 (52.40)	7.02 (29.90)
Habitation area (km <sup>2</sup> , %)	0.34 (1.70)	0.82 (1.60)	4.62 (19.70)
Others (km <sup>2</sup> , %)	2.64 (13.20)	5.95 (11.30)	0.77 (3.20)
Total (km <sup>2</sup> )	19.90	52.63	23.50



**Fig. 1.** Map showing the sampling stations for the monitoring of temperature and salinity in Hwaong Reservoir.

의 유입부에서 2.6 km 상류까지 침투하기도 하였으며 하천의 하류부의 하상이 갯벌과 같은 특성을 보였다.

남양천은 유역내 임야가 10.48 km<sup>2</sup>로 전체 유역면적의 52.7%를 차지하고 있으며 그 외 농경지 32.4%, 대지 1.7% 등으로 구성되어 있다(Table 1). 자안천 유역의 경우도 유역면적의 52.4%가 임야(27.6 km<sup>2</sup>)로 구성되어 있으며, 농경지가 34.7% 그리고 대지가 1.6%를 차지하고 있다. 다른 하천의 유역에서 임야가 차지하는 높은 구성비와는 달리 어은천 유역의 토지이용은 임야가 전체 유역면적의 7.02 km<sup>2</sup>로 29.9%를 차지하는 반면에, 농경지

**Table 2.** Description of the major sampling stations in Hwaong Reservoir. GPS: global positioning system.

Sampling stations		GPS position	Description
Hwaong Reservoir	R1	N37° 08'40.5"E126° 44'47.7"	Inlet part of Namyang Stream
	R2	N37° 08'22.0"E126° 45'09.4"	Inlet part of Jaan Stream
	R3	N37° 07'35.1"E126° 43'41.2"	Confluent point of Namyang and Jaan Stream
	R4	N37° 05'18.0"E126° 42'56.8"	Inlet part of Oeun Stream
	R5	N37° 06'29.5"E126° 42'12.2"	Central part of reservoir
	R6	N37° 06'38.4"E126° 41'26.0"	Near the dike

가 11.09 km<sup>2</sup> (47.2%)로 가장 높은 구성비를 나타내고 있다 (농업기반공사, 2000, 2001).

## 2. 현장조사 및 수질측정

현장조사는 2002년 6월부터 2006년 1월까지 월 1회 수행하였다. 조사지점은 저수지내의 6개 지점을 선정하였다 (Fig. 1). 유역의 하천 유입부 3개 지점 (R1: 남양천 유입부, R2: 자안천 유입부, R4: 어은천 유입부)과 호수의 개방수역 3개 지점 (R3, R5, R6)에서 조사하였다 (Table 2). 저수지내 각 조사지점은 초기에 측정한 위성항법위치 추적장치 (global positioning system, GPS; Garmin, USA) 자료를 이용하여 매번 동일한 정점에서 수행하였다. 전체적으로 상·하류 수평적 조사 뿐만 아니라 각 정점에서 표층 (수심 10 cm), 중층 (전체 수심의 절반수심), 저층 (저층으로부터 10 cm 위)의 3개 수층으로 구분하여 수직적 조사를 동시에 수행하였다. 또한, 조사할 당시에 바람 등의 기상 악화로 인해 현장 환경이 열악하거나 동계의 결빙된 시기에는 가능한 범위까지만 조사하였다.

수층별로 시료를 채수하기 위해 측심기 (Hondex PS-7 digital sounder, Japan)를 이용하여 수심 측정을 선행하였다. 그 후 3개 층에서 수평형 채수기 (Van-Dorn sampler, Wildco, USA)를 사용하여 교란을 최소화하여 채수하였다. 수온은 YSI-57 meter (Yellow Springer Instrument, USA)로 측정하였고, 염분도는 Conductivity meter (LF191, WTW, Germany)로 측정하였으며, 수심별 공간 분포를 확인하기 위해 CTD meter (Sea Bird Electronics Inc.)를 동시에 사용하였다. 강수량은 기상청의 수원 측후소에 생산되는 기후자료 (www.kma.go.kr)를 수집하여 월 강수량 값으로 정리하였다.

## 3. 자료분석

수온과 염분의 자료분석은 SPSS 12.0 통계소프트웨어를 이용하였다 (SPSS, 2003). 저수지내 정점간의 수온과

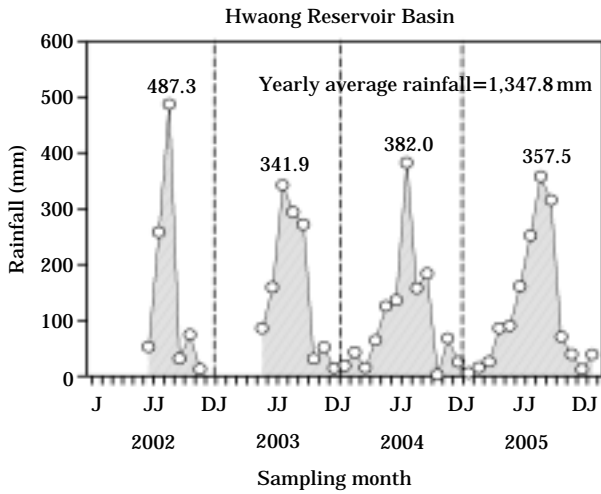
염분 비교는 one-way ANOVA를 이용해 분석하였고, 항목간 상관관계는 Pearson's correlation analysis를 통해 수행되었다. 유의 수준은  $P < 0.05$ 를 기준으로 하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 강수량 변동

화옹호 유역에서 강수량의 월별 및 연도별 변동을 Fig. 2와 Table 3에서 요약하였다. 2002~2005년 동안에 내린 강수량의 범위는 914.4~1,427.7 mm이었고, 총강수량의 평균값은 1,374.8 mm이었다. 월 평균 강수량은 101.4~176.3 mm 범위로서 2003년에 가장 높았고, 2004년에 가장 낮았다. 월 강수량의 최대값 범위는 341.9~487.3 mm (총강수량의 22.6~39.6% 범위)이었고, 최소값은 2.0~30.6 mm이었다. 이 중에서 최대값을 보인 시기는 7~8월 사이였고, 최소값은 10~11월 및 1월에 해당하였다 (Fig. 2).

월 강수량이 100 mm 이상인 시기를 고려할 때 계절적으로 6~9월 사이에 연중 강수량의 67.3~76.0%로서 매우 풍부하였으며 이것은 전형적인 온대지역의 장마 (monsoon)와 태풍의 영향이었다. 2002~2005년 동안에 연간 총강수량은 2003년과 2005년에 각각 1,514.8 mm, 1,427.7 mm이었고, 2002년과 2004년에는 각각 1,231.7 mm, 1,217.0 mm이었다 (Table 3). 연도별 총강수량은 2002~2005년의 평균값 (1,374.8 mm)과 비교할 때 홀수년도 (2003, 2005)에 더욱 많았다. 반면에, 집중호우 등에 의한 최대 강수량은 낮았으나, 50 mm 이상의 강수 빈도 및 범위가 조금 넓었다. 따라서 유역의 강수량은 총강수량과 최대 강수량의 의미를 달리함을 알 수 있었고, 이러한 결과는 염분의 변화 등 하구에 위치한 저수지의 수환경에 차별적인 영향을 미쳤을 것으로 추정된다 (최 등, 2000; 고, 2001; Medina-Gomez and Herrera-Silveira, 2003; Newton and Mudge, 2003).



**Fig. 2.** Monthly variation of rainfall in the Hwaong Reservoir Watershed from June 2002 to January 2006. These data were obtained from the Suwon office, Korea Meteorological Agency.

**Table 3.** Mean values of precipitation in the Hwaong Reservoir Watershed during the study period. Plus-minus values indicate standard deviation.

Factors \ Sampling years	2002	2003	2004	2005
Total (mm)	914.4	1,233.8	1,217.0	1,427.7
Mean ± SD (mm)	152.4 ±186.5	176.3 ±126.2	101.4 ±107.3	119.0 ±124.1
Maximum (mm)	487.3 (August)	341.9 (July)	382.0 (July)	357.5 (August)
Minimum (mm)	12.2 (November)	30.6 (October)	2.0 (October)	5.7 (January)

**2. 수온의 시공간적 분포**

2002년 6월~2006년 1월 동안에 수온의 범위와 평균값은 각각 -0.7~33.4°C, 13.6°C이었다 (Fig. 3, Table 4). 정점별 수온의 평균값(범위)은 표층, 중층, 저층에서 각각 13.8°C (-0.7~33.4°C), 13.2°C (-0.7~30.1°C), 13.9°C (-0.6~28.8°C)이었다. R1에서 높았고, R5에서 낮았다 (Fig. 3). 표층 수온의 평균값은 6~8월에 24.9°C로서 가장 높았고, 12~2월에 3.6°C로서 가장 낮아 계절적인 영향이 현저하였다. 중층과 저층의 수온은 표층 변동과 유사한 경향을 보였다. 수온은 4~5월과 9~11월에 각각 급증 및 급감하였고, 12~3월과 6~8월 사이에 변동 폭이 크지 않았다 (Fig. 3, Table 5).

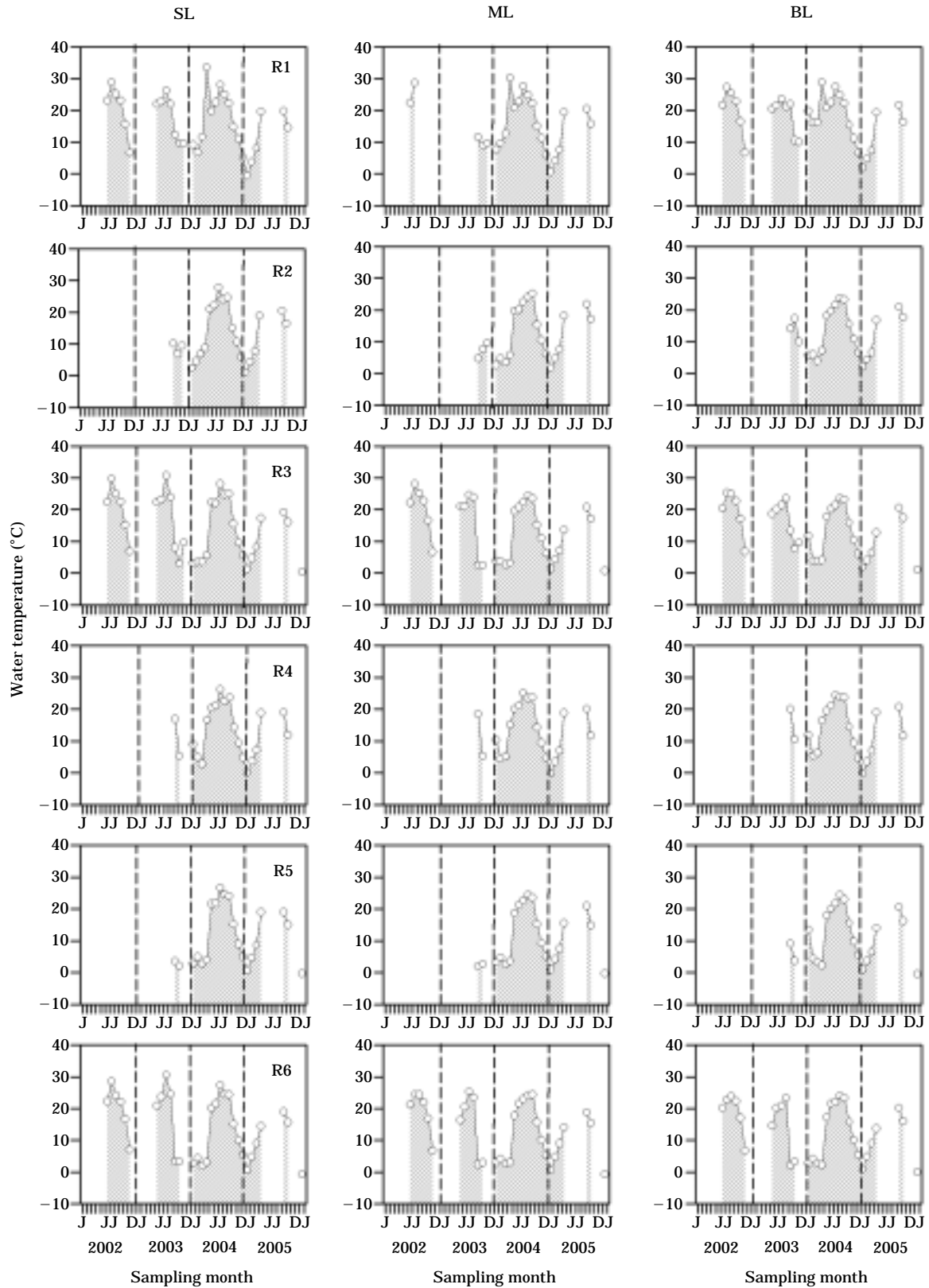
저수지의 상류부(하천 유입부)와 하류부(수문 부근)를

비교할 때, 상류부의 수온은 봄철~여름철과 여름철~가을철로 전이될 때 빠르게 증가 또는 감소하였으나 하천 유입량이 많은 시기에는 일시적으로 급감하는 현상을 보이기도 하였다 (Fig. 3). 반면에, 겨울철에는 상류부(R1) 저층의 수온이 표층이나 하류부보다 다소 높은 양상을 보이기도 하였다. 또한 12~1월 사이에는 하천의 직하류부(R1, R2, R4), 육지와 가까운 수역 및 전수역에서 완전 결빙된 시기도 있었는데 이 시기에는 수온이 영하로 측정되기도 하였다 (Fig. 3). 수온이 영하로 분포하는 것은 대기의 기온이 급강하는 영향으로 볼 수 있으며 바람이 강하게 불고, 결빙이 장기화될 때 관찰되기도 한다 (Nixon and Kremer, 1977).

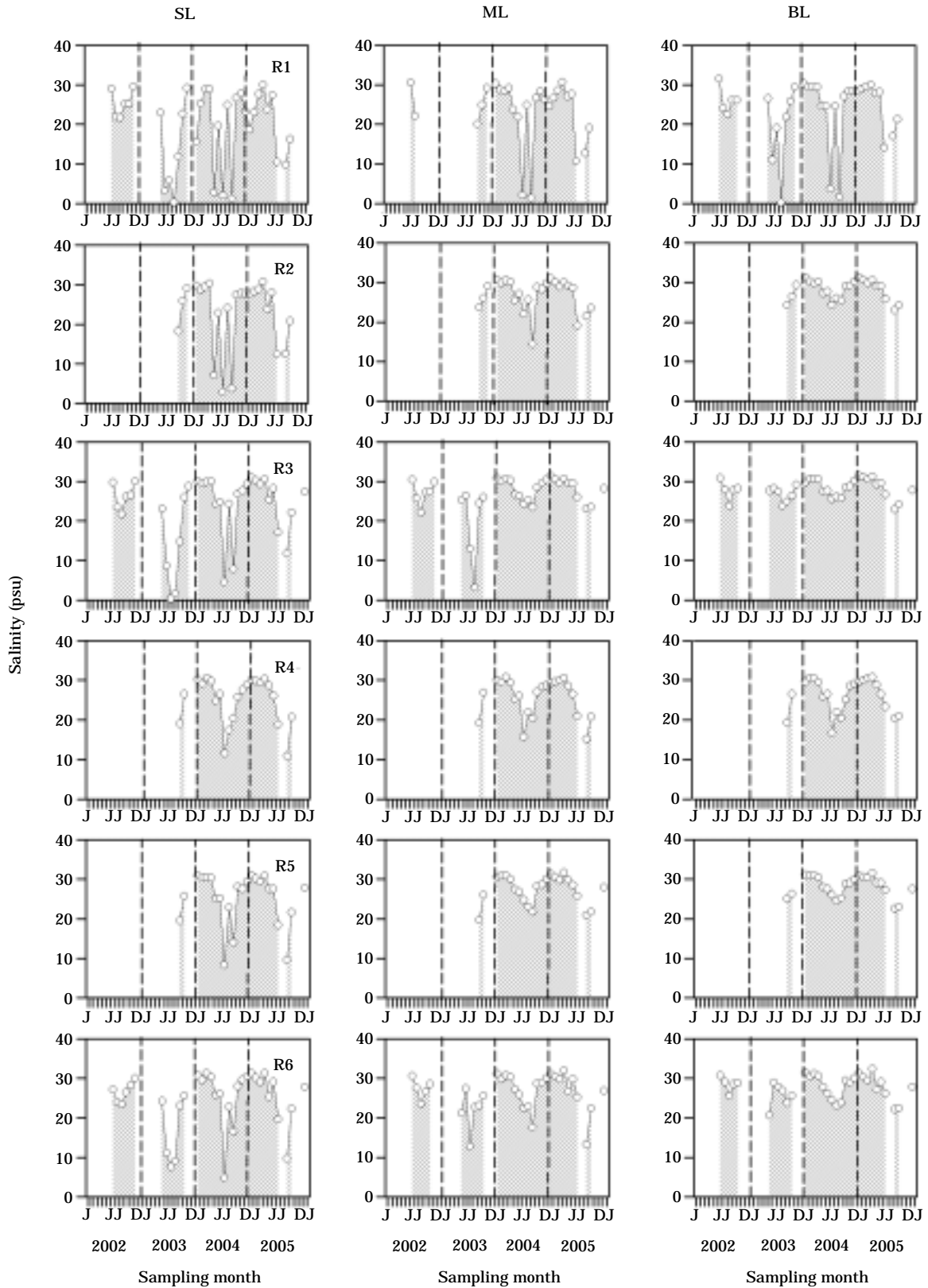
간척호에서 해수 유입이 없는 시기의 겨울철에 수심별 수온의 변화가 크지 않으나 여름철로 접어들면서 표층과 저층의 수온 차가 점진적으로 크게 벌어지게 되는 특성을 보이게 된다 (최 등, 2000). 박 등 (1997)에 의하면, 시화호에서 해수의 유입이 없었던 시기 (1995년 10월~1996년 3월)에 수심별 수온 자료에서 저층 수온이 높은 수온 역전 현상이 발생하였는데 이러한 현상은 겨울철 수온 강하가 표층에서 선행하여 이루어지며, 저층 표층수가 고염 저층수의 열손실을 방지하고 있는 것으로 해석하였다. 최 등 (2000)도 동일 수역의 비슷한 시기 (1997년 10월~1998년 2월)에 표층에 비해 저층 수온이 상대적으로 높은 수온 역전현상이 관찰됨을 보고하였다. 이 시기는 해수를 유입시킨 기간으로서 저층 고온수의 염분이 높은 것을 고려하여 상대적으로 고온 고염의 해수가 밀려드는 것으로 해석하였다. 배수갑문을 통한 지속적인 해수유입으로 인해 겨울철에 전 수층의 수온이 약 0°C에 근접된 균일한 분포를 나타냈고, 여름철로 갈수록 태양복사량이 증가함으로서 다시 전 수층의 수온도 동시에 증가하는 계절적인 패턴을 설명하였다. 이러한 변화 경향은 화옹호에서 조사 관찰된 결과와 유사하였다.

**3. 염분의 시공간적 분포**

염분의 범위와 평균값은 각각 0.3~32.3 psu, 25.3 psu 이었다 (Fig. 4). 정점별 염분의 평균값(범위)은 표층, 중층, 저층에서 각각 23.2 psu (0.3~31.2 psu), 26.0 psu (1.4~31.9 psu), 26.8 psu (0.3~32.3 psu)이었고, R5에서 높았고, R1에서 낮았다 (Fig. 4, Table 4). 염분은 수층에 따른 상하 수직적 차이가 현저하였다. 중층과 저층보다 표층에서 증감 변동이 매우 심하였고, 저층은 정점 R1을 제외하고는 전 정점에서 현저한 차이를 보이지 않았다. 따라서 저수지내 염분의 수직적 구배가 뚜렷하게 유지되



**Fig. 3.** Spatial and temporal variations of water temperature in Hwaong Reservoir from June 2002 to January 2006. SL: surface layer, ML: middle layer, BL: bottom layer, respectively.



**Fig. 4.** Spatial and temporal variations of salinity in Hwaong Reservoir from June 2002 to January 2006. SL: surface layer, ML: middle layer, BL: bottom layer, respectively.

**Table 4.** Horizontal and vertical distribution of temperature and salinity in Hwaong Reservoir. SD: standard deviation, SL: surface layer, ML: middle layer, BL: bottom layer.

Sampling stations	Water layer	Temperature (°C)			Salinity (psu)		
		Mean±SD	Max.	Min.	Mean±SD	Max.	Min.
R1	SL	16.8±8.5	33.4	-0.6	19.4±9.6	30.0	0.3
	ML	15.6±8.4	30.1	0.5	23.3±8.1	30.6	1.4
	BL	17.8±7.2	28.8	2.0	23.3±8.4	31.5	0.3
R2	SL	12.8±8.2	27.8	1.0	22.8±8.7	30.7	2.9
	ML	12.1±7.9	25.1	1.8	26.8±4.2	31.0	14.4
	BL	13.0±7.1	23.7	2.1	28.1±2.5	31.2	23.0
R3	SL	14.9±9.5	30.7	0.4	22.9±8.9	31.0	0.3
	ML	14.1±9.1	28.0	0.7	27.0±3.7	31.3	12.9
	BL	14.3±7.8	25.2	1.1	27.4±4.8	31.4	3.1
R4	SL	12.9±8.0	26.2	0.0	24.9±6.0	30.6	10.8
	ML	13.1±7.9	25.1	-0.2	25.6±4.8	30.7	15.1
	BL	13.6±7.6	24.4	-0.1	26.1±4.3	30.7	16.7
R5	SL	11.1±9.1	26.6	-0.4	25.1±6.7	31.0	8.3
	ML	10.6±8.6	24.4	-0.4	27.4±3.6	31.7	19.6
	BL	11.2±8.1	24.3	-0.6	28.2±2.7	31.6	22.6
R6	SL	14.5±9.7	30.5	-0.7	24.1±7.5	31.2	4.8
	ML	13.6±8.9	25.3	-0.7	26.0±4.9	31.9	12.7
	BL	13.3±8.5	24.0	0.0	27.6±3.1	32.3	20.6

었다. 이러한 수직적 성층화는 혼합이 원활하지 못함을 의미하며, 온도보다 염분에 의한 영향이 더욱 큼을 알 수 있었다. 염분은 우기에 해당하는 6~10월에 변동 폭이 매우 컸고, 표층의 경우 저염수가 상류에서 하류로 확장되는 현상이 뚜렷하였다 (Fig. 4, Table 5). 이 시기에 표층의 수색은 황토색으로서 하천으로부터 유입 후 공급이 동된 저염수의 탁수층 (turbidity plume)으로 뒤덮는 양상이 전개되었다.

염분은 수중에서 매우 안정적이고 보존성이 뛰어나므로 해수의 수직적 성층도를 파악하는데 유용한 지표로 이용될 수 있는 수질 항목이다 (Simpson *et al.*, 1978). 따라서 밀도 차이가 큰 담수와 해수의 혼합 정도를 관찰하는데 매우 유용하다. 정점 R1의 경우, 담수의 유입량이 급증할 때 거의 담수 환경에 가까운 형태로 유지되다가 이내 기수 또는 해수 환경으로 다시 회복되는 과정을 반복하였다. 이것은 담수와 해수의 염분 농도 차이에 의한 밀도 구배가 형성되는 정도에 따라서 변화하는 현상 (김 등, 1998; 신 등, 2000a; 최 등, 2000; 이 등, 2003)으로서 해양의 연안과 경계를 두고 있는 강 하구 수역에서 나타나는 것과 유사하였다 (신 등, 2000a; 이 등, 2003). 담수가 해수층의 상부로 확장될 때 하부의 고염수 해수층이 역으로 빠르게 침투 (intrusion) 대체되는 형태에 해당한다 (이 등, 2003). 하구 수역에서 조석에 의한 영향으로 나타나지만, 간척호의 저수지는 상·하류 구간의 수위 상승

과 염분 경사 또는 균질화 (평균) 성향이 동시에 작용함으로써 나타난다 (신 등, 2000a).

#### 4. 수온과 염분의 수층간 차이 특성

저수지내 정점별 표층과 저층의 수온 차이를 나타낸 것은 Fig. 5와 같다. 수온 차이에서 양 (+)의 값을 보이는 것은 표층이 저층보다 그 값이 큰 경우이고, 음 (-)의 값을 보이는 것은 저층이 오히려 더 높은 경우에 해당한다. 저수지내 수온의 상·하 차이에 대한 범위는  $-10.6 \sim 9.7^{\circ}\text{C}$ 이었고, 정점별 평균값은  $-0.9 \sim 1.1^{\circ}\text{C}$  범위로서 R6에서 높았고, R1에서 낮았다 (Fig. 5, Table 6). 또한, 정점별 표층과 저층의 염분 농도 차이를 나타낸 것은 Fig. 6과 같다. 표층과 저층간의 염분 차이 범위는  $-27.1 \sim 30.0$  psu이었고, 정점별 평균값은  $-3.4 \sim -0.8$  psu 범위로서 R2~R3에서 높았고, R4에서 낮았다 (Fig. 6, Table 6). 염분이 표층에서 높은 경우는 2002년 11월에 유일하게 1회 관찰되었고, 그 외 다른 시기는 항상 저층에서 월등히 높은 값을 보였다. 염분 농도의 차이가 큰 경우는 담수의 유입량이 크거나 배수갑문의 조작에 의한 해수 유입이 많은 상태에서 나타났다.

간척호는 반폐쇄적인 수역에 해당하므로써 수온의 변동은 태양복사열의 증가에 의한 영향이 가장 주요한 요인으로 작용하게 되어 시공간적으로 표층에서 변화가 가장



**Table 5.** Seasonal distribution of temperature and salinity in Hwaong Reservoir. SD: standard deviation, SL: surface layer, ML: middle layer, BL: bottom layer.

Sampling stations	Water layer	Temperature (°C)			Salinity (psu)		
		Mean ± SD	Max.	Min.	Mean ± SD	Max.	Min.
Spring	SL	13.6 ± 8.0	33.4	2.1	26.9 ± 5.8	31.2	2.7
	ML	12.1 ± 7.4	30.1	2.5	28.8 ± 2.3	31.9	21.1
	BL	12.1 ± 7.1	28.8	2.0	29.1 ± 2.2	32.3	20.6
Summer	SL	24.9 ± 2.7	30.7	21.2	17.6 ± 9.4	29.7	0.3
	ML	23.4 ± 2.1	28.6	20.1	23.7 ± 5.6	30.5	2.0
	BL	22.6 ± 2.0	27.4	19.6	24.2 ± 6.9	31.5	0.3
Autumn	SL	13.8 ± 6.4	24.9	2.1	21.7 ± 7.5	30.0	1.2
	ML	13.8 ± 6.9	25.1	1.9	23.6 ± 5.6	29.8	1.4
	BL	15.1 ± 5.9	23.6	2.0	25.0 ± 4.5	29.4	1.6
Winter	SL	3.6 ± 2.5	9.1	-0.7	28.2 ± 3.5	31.2	15.5
	ML	3.8 ± 2.6	10.3	-0.7	29.6 ± 1.6	31.3	24.5
	BL	5.2 ± 4.6	19.7	-0.6	30.0 ± 1.1	31.4	27.6

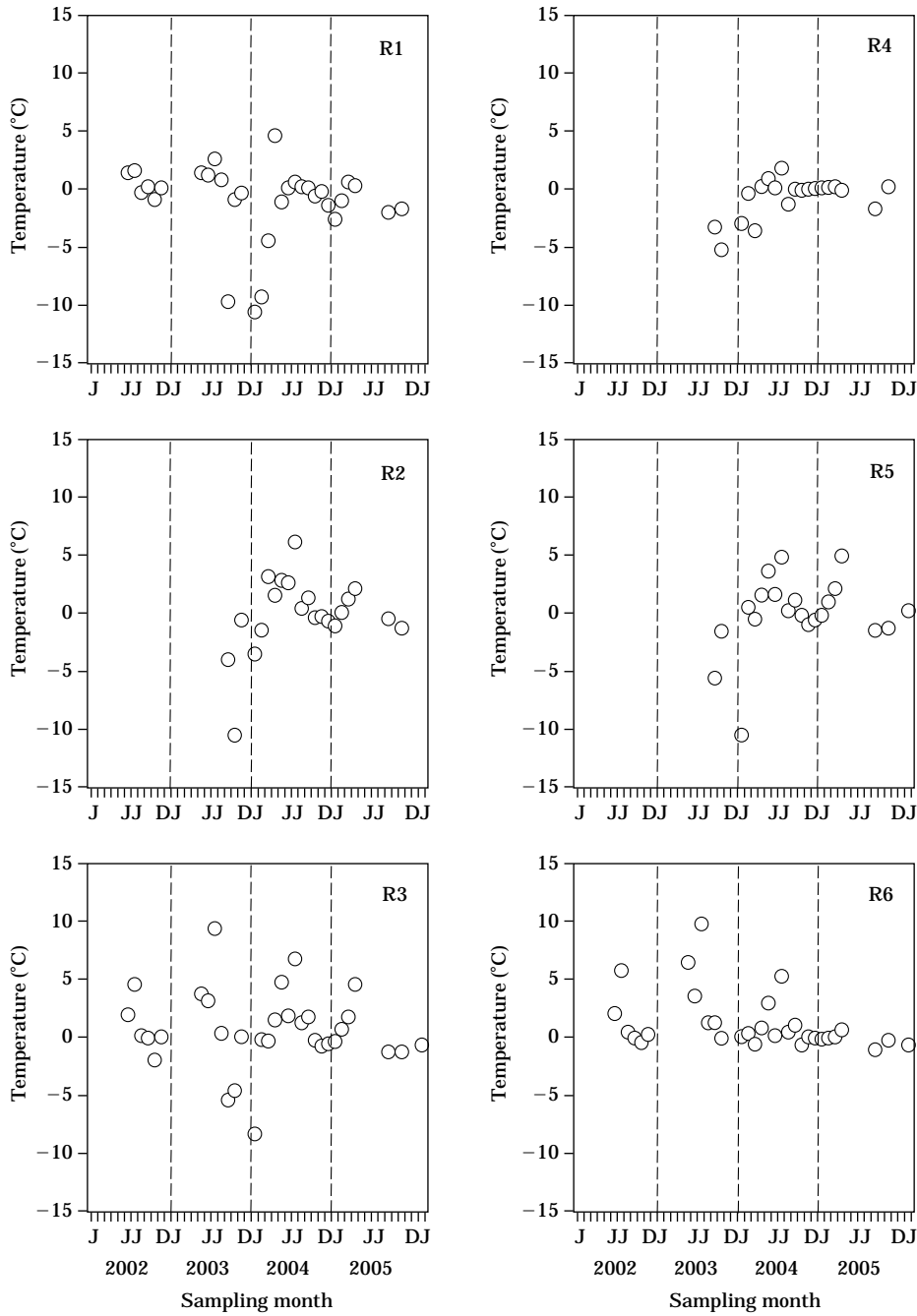
크다(최 등, 2000). 표층과 저층간의 차이는 최대 10°C 이상으로서 다른 간척호에서 관찰된 내용과 유사하였다. 또한, 저수지내의 염분 변화는 하천으로부터 유입되는 담수에 의해 염분이 지속적으로 감소되며, 외해로부터 해수가 유입되면서 염분의 변화 폭이 급격하게 커지게 되고, 동시에 전 수역의 수층에서 염분의 평균값이 점차 증가하게 되는 양상을 보이게 된다(김 등, 1998; 최 등, 2000; 김 등, 2002). 시화호의 경우, 배수갑문의 운용에 의해 해수가 유입됨에 따라 정점별로 염분의 수직적 차이가 점차 작아지면서 성층이 크게 약화됨을 보고하였다(고, 1998; 최 등, 2000). 낙조류시에는 저수지의 담수가 외해로 유출되고, 창조류시에는 그 반대로 외해의 해수가 저수지내로 유입되도록 배수갑문의 인위적인 개폐가 이루어지고 있다. 저수지와 외해간의 물 교환으로부터 수체의 유동성이 나타나며, 시화호의 경우 평균 유속이 약 5 cm sec<sup>-1</sup> 이하이었고, 유향도 급변하였다(최 등, 2000).

### 5. 수온과 염분의 상호 관련성

수온과 염분 농도의 정점 및 수층별 평균값과 표준편차를 이용하여 상호 관련성을 나타낸 것은 Fig. 7과 같다. 수온과 염분의 관계는 음의 상관성을 보여, 즉 수온이 높을수록 염분 농도가 낮은 특성을 보였다. 수온의 평균값 차이는 7.2°C이었고, 염분은 8.8 psu이었으며 수온보다 염분 농도의 편차는 상류에서 큰 반면에 하류로 갈수록 절대 염분 농도의 차이가 더욱 컸다. 이것은 담수 유입량과 수심의 차이로 볼 수 있었고, 수체의 유동성과 밀접한 관련성이 있었다(신 등, 2000a).

표층을 중심으로 볼 때, 대부분 수역에서 25 psu 이하로 분포하였고, R1에서만 20 psu 이하이었다(Fig. 7). R2의 경우는 R1과 마찬가지로 하천의 직하류에 해당하나 R3와 비슷한 염분 농도를 보이는 것은 홍수기를 제외하고는 하천(자안천)의 하구에서 갑문으로 방류량이 조절되어 비교적 고립된 환경이 이루어지기 때문이었다. R6는 인접한 R4보다는 R1~R3의 영향을 더욱 많이 받는 것으로 분석되었고, R4는 하천수가 유입되자마자 간척지를 따라 넓게 퍼지는 지형 구조를 가지고 있어 담수의 영향이 급격하게 소멸됨을 알 수 있었다. 끝으로, R5는 저수지의 중심부에 해당하여 수심이 가장 깊은 곳으로서 표층에서 가장 높은 농도를 유지하였다. 또한, 다른 정점에 비해 수체의 안정성이 다소 높은 지점으로 평가되었고, 수직 분포에서도 수층별 염분 농도 차이가 가장 적은 결과에서 뒷받침되어진다.

수온과 염분의 수층별 평균값과 표준편차에 의한 계절적 상호 관련성을 나타낸 것은 Fig. 8과 같다. 계절에 따른 수온과 염분의 평균값 차이는 각각 21.3°C, 12.4 psu이었다. 수온의 평균값은 여름철에 높고 편차는 작았으며, 겨울철에는 상반된 구조를 보였다. 이러한 양상은 여름철에 담수 유입량이 급증한 영향도 있으나 현재, 주기적인 배수갑문 운영을 하지 않은 상태에서 저수지의 수질은 부영양화에 따른 식물플랑크톤의 발생량이 극도로 높아져서 이에 대한 수질개선을 위해 조석 주기에 따라 저수지내 담수와 해수의 교환시키는 작용에 의한 영향이 크다고 볼 수 있다. 특히, 갈수기에 해당하는 겨울철에 더욱 뚜렷하게 반영되었고, 정점간에 차이가 적다는 것은 해수 유입의 영향이 상류부까지 미치고 있음을 간접적으로



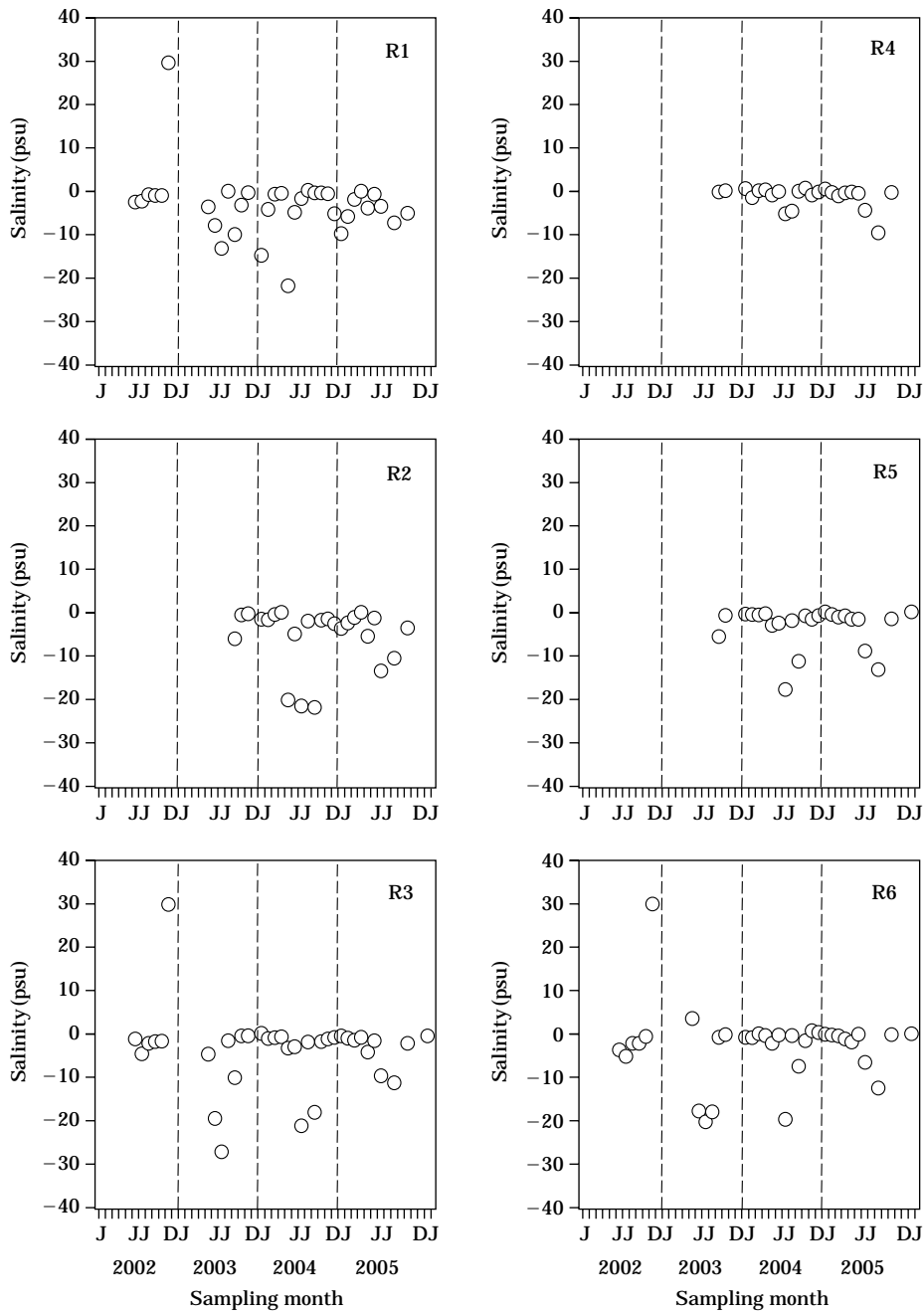
**Fig. 5.** Spatial and temporal variations of the temperature difference between surface layer and bottom layer in Hwaong Reservoir from June 2002 to January 2006.

로 암시하고 있는 것이었다.

**6. 간척호에서 염분의 중요성**

화옹호는 방조제와 수문이 완공되었으나 완전 체절 후

이내 상류부의 수질이 매우 악화됨으로써 담수와 해수를 주기적으로 교환하고 있는 실정에 있다 (Hwang *et al.*, 2003). 기존의 갯벌 환경하에서 하천수의 유입 영향은 조석 활동에 따라 다량의 해수의 희석 작용으로 미미하게 반영되었으나, 담수호 조성을 위한 체절은 초기에 다양한

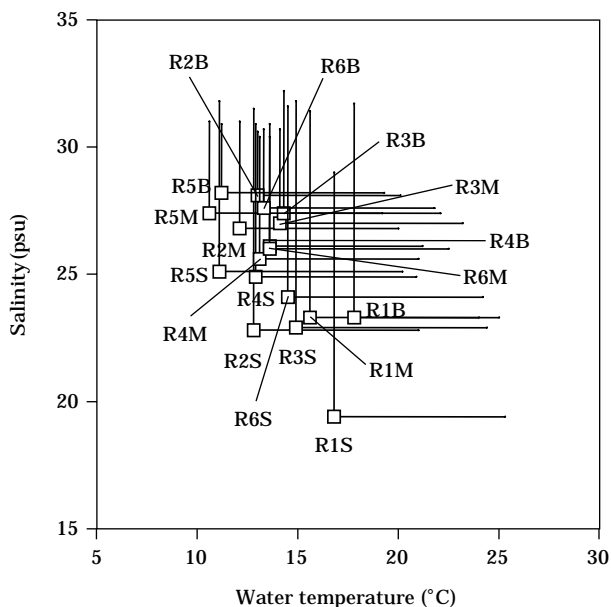


**Fig. 6.** Spatial and temporal variations of the salinity difference between surface layer and bottom layer in Hwaong Reservoir from June 2002 to January 2006.

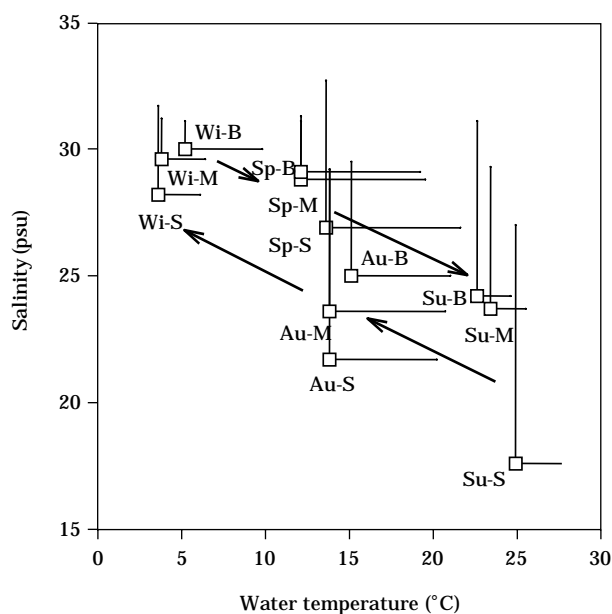
문제점을 가질 수 있다. 첫째로, 유기물이 풍부한 갯벌이 담수됨으로써 수중의 산화·환원상태에 따라 내재된 유기물이 지속적으로 분해되는 무기화 과정이 장기간 유지될 것으로 보여진다. 둘째로, 유역관리의 미비로 인해 산재된 오염원으로부터 배출되는 오염물질이 공급됨으로써 수질 부영양화는 더욱 가속화될 수 있는 잠재력을 포함

하고 있다. 셋째는 해수 유입시 간석지의 교란 작용에 의해 공급되는 다량의 유기물이 저수지 내부로 확산되어 축적되는 현상이 고려되어야 한다.

간척호에서 저층의 염분 존재는 수체의 상·하층을 분리하는 화학적 성층현상(chemocline)을 야기하게 되고, 무산소상태의 장기화는 저질층 공극수 영양염의 용출을



**Fig. 7.** Scatter plot of relationship between water temperature and salinity in Hwaong Reservoir from June 2002 to January 2006. R1~R5 indicate sampling stations within reservoir. S: surface layer, M: middle layer, and B: bottom layer, respectively.



**Fig. 8.** Seasonal pattern of relationship between water temperature and salinity in Hwaong Reservoir from June 2002 to January 2006. Sp: spring, Su: summer, Au: autumn, Wi: winter, S: surface layer, M: middle layer, and B: bottom layer, respectively.

**Table 6.** Comparison of differences of temperature and salinity between surface and layers at six stations of Hwaong Reservoir. SD: standard deviation.

Sampling stations	Temperature (°C)		Salinity (psu)	
	Mean±SD	Max. Min.	Mean±SD	Max. Min.
R1	-0.9±3.2	4.6 -10.6	-3.0±7.3	29.6 -21.8
R2	-0.1±2.6	6.1 -10.5	-3.4±6.1	0.1 -21.8
R3	0.6±3.2	9.3 -8.3	-3.4±8.6	29.9 -27.1
R4	-0.5±1.4	1.8 -5.2	-0.8±2.0	0.7 -9.6
R5	-0.1±2.6	4.9 -10.5	-2.0±4.1	0.2 -17.7
R6	1.1±2.4	9.7 -1.1	-2.4±8.2	30.0 -20.2

가속화하게 된다 (Han and Park, 1999; 신 등, 2000b). 이러한 현상은 간척호와 유사한 환경으로서 해양과 경계를 두고 있는 석호 (lagoon)에서 빈번하게 관찰되는 부분이다 (Medina-Gomez and Herrera-Silveira, 2003; Newton and Mudge, 2003). 또한, 시화호의 경우가 대표적인 사례로 들 수가 있다. 시화호는 유역의 오염원 관리뿐 만 아니라 저수용량에 비해 유입량이 적어서 담수화 과정에서 단기간에 염분의 조절관리가 어려웠던 것이 가장 결정적인 문제점이었다 (고, 1998; 이, 1999). 염분 성층화 조절의 실패는 부영양화를 더욱 가속화시켰고, 이후 다양한 환경

오염 문제가 복합적으로 대두되었으며, 다시 해수화로 결정하면서 인위적으로 해수를 소통합에 따라 당초 목적이었던 담수 환경이 아닌 해역 형태의 수질관리로 전환하게 되었다. 현재는 수질오염을 개선하기 위한 작용으로 해수 유입량 및 담수 방류량을 증가시키게 되었고, 그 일환으로서 조력발전을 위한 건설 공사가 이루어지고 있다.

기존에 조성된 간척호 (예: 평택호)에서 염분의 영향은 배수갑문 부근인 하류부의 저층에서만 약간 관찰될 뿐 전 수역이 빠르게 담수화가 진행되었다 (신, 2003). 담수화 과정에서 제염 활동은 물질순환 등 환경요인의 상호 작용에서 매우 중요한 것으로 볼 수 있으며, 하천의 유입량이 클수록 그 영향은 단축될 수 있다. 또한, 수층은 담수로 대체되면서 저질층은 상류로부터 공급되는 토양 입자 성분의 운반에 의해 축적되는 효과를 동시에 수반하게 된다 (고, 2001). 이에 의해 저질층의 특성이 변화하는 결과를 가져오게 되고, 개별 토양층의 상부에 육상 기원성 토양층이 형성되며, 내부생성유기물과 함께 축적하게 될 것으로 추정된다. 최종적으로, 이러한 과정을 통해 완성된 수환경은 개별과 해수환경에서 담수화를 더욱 가속화하는데 크게 기여할 것으로 판단되어진다.

## 적 요

본 연구는 간척호 조성 초기 단계에 있는 화옹호를 대상으로 수환경의 변화를 파악하고자 2002년 6월부터 2006년 1월까지 수행하였다. 화옹호는 해양환경을 담수화시키는 과정에 있으므로 다양한 환경요인 중에서 강수량, 수온 및 염분도의 월 변동을 중심으로 하였다. 수온의 범위와 평균값은 각각  $-0.7 \sim 33.4^{\circ}\text{C}$ ,  $13.6^{\circ}\text{C}$ 이었다. 상류부의 수온은 봄철~여름철과 여름철~가을철로 전이될 때 빠르게 증가 또는 감소하였으나 하천 유입량이 많은 시기에는 일시적으로 다소 급감하는 현상을 보이기도 하였다. 반면에, 겨울철에는 상류부 저층의 경우 표층이나 하류부보다 수온이 다소 높은 양상을 보이기도 하였다. 염분의 범위와 평균값은 각각  $0.3 \sim 32.3 \text{ psu}$ ,  $25.3 \text{ psu}$ 이었다. 염분은 수층에 따른 상하 수직적 차이가 현저하여 중층과 저층보다 표층에서 증감 변동이 매우 심하였다. 남양천이 유입되는 상류부의 저층을 제외하고는 전 정점에서 현격한 차이를 보이지 않았다. 이것은 저수지내 염분의 수직적 구배가 뚜렷하게 유지되고 있음을 의미하였다. 염분은 여름철 강우기에 해당하는 6~10월에 변동 폭이 매우 컸고, 표층의 경우 저염수가 상류에서 하류로 확장되는 현상이 뚜렷하였다. 이 시기에 표층의 수색은 황토색으로서 하천으로부터 유입 후 공급 이동된 저염수의 탁수층(turbidity plume)으로 뒤덮는 양상이 전개되었다. 저수지내 수온의 상·하 차이에 대한 범위는  $-10.6 \sim 9.7^{\circ}\text{C}$ 이었다. 또한, 표층과 저층의 염분 차이는  $-27.1 \sim 30.0 \text{ psu}$  범위이었다. 염분 농도의 차이가 큰 경우는 담수의 유입량이 크거나 배수갑문의 조작에 의한 해수 유입이 많은 상태에서 나타났다. 수온과 염분의 관계는 음의 상관성을 보여, 즉 수온이 높을수록 염분 농도가 낮은 특성을 보였다.

## 사 사

본 연구는 농림부 농림기술개발사업의 “BASINS 및 WASP을 이용한 화옹 유역과 호소의 통합수질예측시스템 개발”과 안산환경기술개발센터의 환경기술연구개발사업 “화옹호 조성에 따른 수질오염도 및 생태계 변화추이 조사(I, II)”의 연구지원에 의해 수행되었으며 지원에 대해 감사드립니다.

## 인 용 문 헌

- 경기도. 2002. 화옹호 수질개선대책.
- 고석구. 1998. 시화호 수질관리. 대한토목학회논문집 **46**: 13-18.
- 고철환. 2001. 한국의 갯벌 - 환경, 생물 그리고 인간. 서울대학교 출판부, 서울, pp. 645-951.
- 김미아, 김영희, 이흥근, 황대호, 김지영. 2004. 화옹호의 부영양화 방지를 위한 영양염류 삭감률 산정. 한국물환경학회지 **20**: 589-596.
- 김은수, 김정태, 조성록. 1998. 시화호 해수 및 표층 퇴적물의 생지화학적 연구. 해양연구 **20**: 237-250.
- 김중구, 김준우, 조은일. 2002. 시화호의 배수갑문 운용에 따른 수질변화. 한국환경과학회지 **11**: 1205-1215.
- 농업기반공사 농어촌연구원. 2000. 화옹지구 간척지 개발사업 담수호 수질개선대책 조사보고서 I(화옹담수호수질개선대책안).
- 농업기반공사 농어촌연구원. 2001. 화옹지구 간척지 개발사업 담수호 수질개선대책 조사보고서 II(기본조사 보고서).
- 박용철, 박준진, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희. 1997. 시화호 산화-환원 환경하의 용존 유·무기 화합물의 생지화학적 연구. 바다(한국해양학회지) **2**: 53-68.
- 신재기, 김동섭, 조경제. 2000a. 시화호에서 해수유입 전·후의 수환경 요인과 식물플랑크톤 동태. 한국환경과학회지 **9**: 115-123.
- 신재기, 김동섭, 조경제. 2000b. 시화호에서 무기영양염과 식물플랑크톤 동태. 육수지 **33**: 109-118.
- 신재기, 황순진, 김동섭, 강창근. 2003. 시화호 유역에서 배수시스템별 하천수의 비육도 비교. 육수지 **36**: 381-388.
- 신재기. 2003. 평택호에서 수환경과 식물플랑크톤의 계절적 동태. 한국조류학회지 **18**: 145-156.
- 유명진, 홍대벽, 조용균, 권은미, 구윤희. 2000. 새만금 유역의 강우시 오염물질 유출 특성. 대한환경과학회지 **22**: 1609-1616.
- 이기영, 성현찬, 송미영, 이상협, 황순진. 1999. 화옹호 오염원 및 부영양화 평가와 수질개선을 위한 종합연구. 경기개발연구원 연구보고서. 176p.
- 이봉훈. 2006. 비점오염포럼: 농업용수 수질개선대책 추진방향. 서울대학교, 서울, pp. 45-66.
- 이상호, 최현용, 손영태, 권효근, 김영근, 양재삼, 정해진, 김중구. 2003. 하계 서해안 새만금 연안역 주변 저염수와 순환. 바다(한국해양학회지) **8**: 138-150.
- 이효재. 1999. 시화호의 실패. 한국지방행정연구원 지방포럼 **1**: 86-88.
- 장재호, 윤춘경, 정광옥, 김형철. 2006. 화옹유역 남양천의 수질관리를 위한 QUAL2E 적용과 위해성 평가. 육수지 **39**: 110-118.
- 정광옥, 윤춘경, 장재호, 김형철. 2006. 유역의 토지이용과 오염원 현황이 수질특성에 미치는 영향 분석. 육수지 **39**: 41-

51.  
정미희, 김호섭, 최청일, 황순진. 2004. 화옹호의 식물플랑크톤과 환경요인. *육수지* **37**: 193-204.
- 정종철. 2000. 시화호 갑문조절을 통한 수질개선 효과 분석. *한국물환경학회지* **16**: 1-8.
- 정희수, 최강원, 김동선, 김채수. 1997. 한국 서해안 시화호의 오염 현황과 환경개선 방안. *해양정책연구* **12**: 123-163.
- 조홍연. 2005. 시화호 배수갑문 조작에 의한 염도 및 탁도 변화. *한국해양과학기술협의회 공동학술대회 초록집*, pp. 642.
- 최정훈, 김계영, 홍대벽. 2000. 배수갑문 운용에 따른 시화호의 수온과 염분 변화. *한국지구과학회지* **21**: 541-552.
- 홍사육, 조현영, 나규환. 1976. 아산호의 육수학적 연구. *육수지* **9**: 55-59.
- 황순진. 2002. 화옹호 조성에 따른 수질오염도 및 생태계 변화 추이 (I). *안산환경기술개발센터 조사보고서*.
- 황순진. 2003. 화옹호 조성에 따른 수질오염도 및 생태계 변화 추이 (II). *안산환경기술개발센터 조사보고서*.
- APHA. 1997. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed., American Public Health Association, Washington, D.C., USA.
- Choi, C.I., Y.H. Chung, I.S. Wui, S.K. Baik, J.B. Lee and S.I. Yang. 1985. Limnological studies on Lake Yongsan, Korea. *Korean J. Limnol.* **18**: 15-26.
- Han, M.W. and Y.C. Park. 1999. The development of anoxia in the artificial Lake Shihwa, Korea, as a consequence of intertidal reclamation. *Marine Pollution Bulletin* **38**: 1194-1199.
- Hwang, S.J., H.S. Kim, M.H. Chung and C.I. Choi. 2003. Water quality and chlorophyll-*a* at the birth stage of a large reclaimed estuarine lake in Korea (Lake Hwaong). *Korean J. Limnol.* **36**: 455-462.
- Kalff, J. 2002. Limnology-Inland Water Ecosystems. Prentice-Hall, Inc. USA. pp. 202-217.
- Ketchum, B.H. 1983. Estuarine characteristics. *In*: Ketchum, B.H. ed. *Ecosystems of The World 26- Estuaries and Enclosed Seas*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Netherlands. pp. 1-14.
- Kishi, M.J. 2000. Coastal lagoon ecosystems: a case study in lakes Nakaumi and Shinji, Japan. *Journal of Marine Systems* **26**: 115-116.
- Kremer, J.N. and S.W. Nixon. 1978. Ecological Studies 24- A Coastal Marine Ecosystem: Simulation and Analysis. Springer-Verag Berlin · Heidelberg, Germany. pp. 5-13.
- Lenz, J. 1977. Hydrographic conditions. *In*, Rheinheimer, G. ed. Ecological Studies 25- Microbial Ecology of a Brackish Water Environment. Springer-Verag Berlin · Heidelberg, Germany. pp. 12-25.
- Medina-Gomez, I. and J.A. Herrera-Silveira. 2003. Spatial characterization of water quality in a karstic coastal lagoon without anthropogenic disturbance: a multivariate approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **58**: 455-465.
- Newton, A. and S.M. Mudge. 2003. Temperature and salinity regimes in a shallow, mesotidal lagoon, the Ria Formosa, Portugal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **57**: 73-85.
- Nixon, S.W. and J.N. Kremer. 1977. Narrangansett Bay- the development of a composite simulation model for a New England estuary. *In*: Hall, C. and J. Day. (eds.). *Ecosystem Modelling in Theory and Practice: An Introduction with Case Histories*. Wiley, New York. pp. 622-673.
- Simpson, J.H., C.M. Allen and N.C.G. Morris. 1978. Fronts on the continental shelf. *Journal of Geophysical Research* **83**: 4607-4614.
- SPSS. 2003. SPSS 12.0 base user's guide. SPSS, Chicago, USA.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd Edition. Academic Press, California, USA. 1006p.

(Manuscript received 10 July 2006,  
Revision accepted 30 August 2006)